

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2001年6月7日 (07.06.2001)

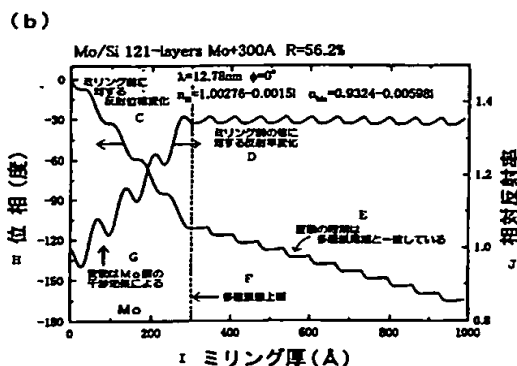
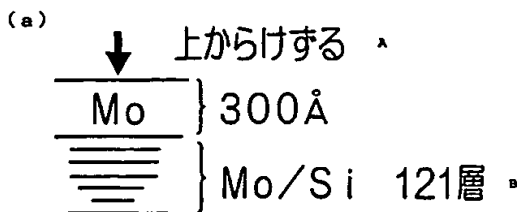
PCT

(10) 国際公開番号
WO 01/41155 A1

- (51) 国際特許分類⁷: G21K 1/06 LTD.) [JP/JP]; 〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468番地 Miyagi (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP00/05571
- (22) 国際出願日: 2000年8月18日 (18.08.2000)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願平 11/337955
1999年11月29日 (29.11.1999) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 株式会社東北テクノアーチ (TOHOKU TECHNO ARCH CO.,
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてののみ): 山本正樹 (YAMAMOTO, Masaki) [JP/JP]; 〒980-0001 宮城県仙台市青葉区中江二丁目15番1-206号 Miyagi (JP).
- (74) 代理人: 重信和男, 外 (SHIGENOBU, Kazuo et al.); 〒102-0083 東京都千代田区麹町4丁目6番8号 ダイニチ麹町ビル3階 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (国内): AU, CA, JP, KR, US.
- (84) 指定国 (広域): ヨーロッパ特許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).
- [続葉有]

(54) Title: OPTICAL ELEMENT SUCH AS MULTILAYER FILM REFLECTION MIRROR, PRODUCTION METHOD THEREFOR AND DEVICE USING IT

(54) 発明の名称: 多層膜反射鏡等の光学素子、その作成方法およびそれを用いた装置



- A...SCRAPE OFF FROM ABOVE
B...121 LAYERS
C...REFLECTION PHASE CHANGE FOR PRE-MILLING
D...REFLECTION FACTOR CHANGE FOR PRE-MILLING VALUE
E...VARIATION FREQUENCY AGREES WITH MULTILAYER FILM FREQUENCY
F...TOPMOST PORTION OF MULTILAYER FILM
G...VARIATION CAUSED BY INTERFERENCE EFFECT OF Mo FILM
H...PHASE (DEGREES)
I...MILLING THICKNESS (Å)
J...RELATIVE REFLECTION FACTOR

(57) Abstract: A multilayer film reflection mirror capable of simply correcting a wavefront phase, and a production method therefor. A reflection mirror using reflection by a multilayer film, wherein the multilayer film is formed with a frequency higher than is necessary for a reflection factor to substantially saturate, and is scraped off according to a wavefront phase regulation amount of an outgoing light to thereby regulate a wavefront phase. Since a correction film and a multilayer film having a capability beyond a substantial saturation of a reflection factor are formed, correction is possible by scraping off the multilayer film even when a correction-film removing is not sufficient for phase correction, whereby more accurate phase correction is implemented.

[続葉有]

TOHOKU TECHNO ARCH CO.

WO 01/41155 A1



添付公開書類:
— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約:

波面位相を補正することが簡単にできる多層膜反射鏡やその作成方法である。

このため、多層膜による反射を用いた反射鏡であって、この多層膜は、反射率が実質的に飽和する以上の周期数が形成されており、多層膜を射出光の波面位相の調整量に応じて削り取ることにより、波面位相を調整している。

また、補正膜と反射率が実質的に飽和する以上の多層膜とを形成することにより、補正膜の削除で位相の補正できない場合、多層膜も削除することにより補正することができ、より精密に位相の補正を行うことができる。

明 細 書

多層膜反射鏡等の光学素子、その作成方法およびそれを用いた装置

技術分野

この発明は、多層膜による反射を用いた反射鏡等の光学素子に関し、特に多層膜反射鏡の射出光の波面位相補正に関するものである。

背景技術

図1に示した電磁波の分類と電磁波の波長との関係を示した図で、まず極端紫外線及びX線を説明する。極端紫外線（極紫外線，EUV：extreme ultraviolet rays）や真空紫外線（VUV：vacuum ultraviolet rays）は、図1（a）電磁波の分類で紫外線よりも波長が短い電磁波のことである。X線とは、図1（a）電磁波の分類と図1（b）電磁波の波長を比較してみてもわかる通り、波長が0.001～50nmの電磁波を指し、その中で軟X線は0.5～50nmのX線のことである。極端紫外線や真空紫外線と軟X線との境界ははっきりと定められておらず、分類で重なっている部分もあるが、極端紫外線、真空紫外線や軟X線は、紫外線と硬X線の間期の波長を持つ電磁波である。極端紫外線、真空紫外線、軟X線の性質としては、透過能が小さく、空気層で吸収されてしまう。しかしながら、特に光子エネルギーが高いことから、金属、半導体、誘電体などの物質を問わず表面から内部に数百nm侵入する透過力を示す。また、特に軟X線は、物質を構成する原子の内核吸収が現れる程度の光子エネルギーを有していることから、各種の物質を構成する元素によってはっきりとした吸収の差が生じる。軟X線のこの性質は、高い分解能とともに、各種の物質研究に最適であり、生体試料を乾燥や染色等の処理を行うことなく、生きたまま観察できるX線顕微鏡開発研究へと発展しつつある。

極端紫外線（真空紫外線）やX線は可視光に比べると光子エネルギーが高く、物質の透過力が高い。このため、極端紫外線やX線はほとんどの物質において屈

折がほとんど起こらないために、レンズを造ることが難しい。従って、極端紫外線やX線を集光したり、像を結ばせるために反射鏡が使われるが、極端紫外線やX線に対しては通常、金属表面でもほとんど反射しない。唯一、表面にすれすれの角度では反射させることができるので、この斜入射を利用した光学系に頼らざるをえなかった。

その後、極端紫外線（真空紫外線）または軟X線を含めたX線を反射できる「多層膜鏡」が大きく注目され、極端紫外線やX線結像光学系に直入射の光学系を開発する道を開いた。X線によるX線顕微鏡は前述の多層膜鏡を用いている。この多層膜鏡を図2で説明する。

図2（a）は、多層膜反射鏡の構成を示し、図2（b）は、反射膜の構成を示している。図2（a）において、多層膜反射鏡は、基板10の上に多層膜20を形成した構成であり、図2（b）は波長13nm（光子エネルギー97eV）付近の軟X線に対する多層膜の構成の例を示す。図2（b）において、多層膜20はモリブデン（Mo）とシリコン（Si）を対にした数十～数百層から構成されている。この構成の多層膜20を図2（a）のように基板10に取りつけてある。この構成の多層膜鏡によって、直入射反射率60%の反射が得られる。

図3は、図2（a）の多層膜反射鏡を用いたX線装置の概略構成例を示す。図3において、中央に穴をあけた凹面の基板10に反射多層膜20を付けた反射鏡と、その真向かいに、同じく凹面の基板に反射多層膜22を付けた反射鏡の2つで構成されている。LはX線であり、光路を示している。

この図3（a）の左方から物体30に向けてX線を照射した構成では、X線Lは多層膜反射鏡20、22によって反射し、拡大された物体の像35が得られる。このとき、図3（a）の装置は図3（b）（1）に示すように、顕微鏡の役目を果たす。可視・紫外光の波長の数十分の1以下であるX線によって結像されたものであるから、このように構成すれば原理的に回折ボケによる解像限界を数十分の1以下にして、極めて微小なものでも精度を改善できる。これらの技術はさらに高精度なX線望遠鏡の開発研究へと発展し、超高温のプラズマから発生する軟X線の観測による、銀河の成因や超新星の構造の解明に寄与している。

また、この図3（a）の右方から物体35に向けてX線を照射すれば、X線Lは多層膜反射鏡22、20によって反射し、縮小された物体の像30が写る。こ

のとき、図3 (a) の装置は図3 (b) (2) に示すように、マイクロフォーカスや縮小露光装置の構成となる。この縮小投影露光光学系のX線多層膜鏡は、次世代の超LSI製造用装置の心臓部として開発する試みが、米国および日本を中心に世界的に競われている。

このように、産業界のみならず学界でもX線多層膜鏡の多方面における応用が期待されている。

これらのX線多層膜鏡は、結像性能を得るために、少なくとも波長の $1/8$ 以下の波面精度を得る必要がある。しかしこの値を達成するには、球面基板の形状精度の計測と制御、この基板上に成膜する高反射率で基板に歪みを与えない多層膜形成法の開発、結像鏡の無歪み保持法、調整法の開発などに加え、最終的には使用するX線波長での波面誤差の計測と補正法の開発が不可欠である。

特に、最終的な結像性能を決定付ける波面収差の補正法は、補正量がnmオーダーであり、困難が大きい。現状では、基板をピエゾ素子駆動などによってnm精度で微小変形させるアダプティブ・オプティクス（補償光学）系方式や、基板表面に薄膜を付加したり基板をイオンエッチングする方法が提案されている。

例えば、反射鏡の形状をアクチュエータでアダプティブに修正する試みがある。これを図4に示した波面収差補正装置で説明する。図4に示すように、波面収差補正装置は、反射鏡の基板10に取り付けたアクチュエータ60で基板10に力を加えて多層膜鏡20の形状を矯正することにより波面を補正する。この補正装置において、ピンホール110を潜り抜けてくる軟X線Lは、ビームスプリッタ120で反射鏡に導かれ、多層膜鏡20で反射する。この構成で、ビームスプリッタ120を通過するLの光路にナイフ・エッジ130を挿入することにより、2次元検出器150に映し出された映像をコンピュータ160で解析して鏡面形状を計測することができる。この計測結果により制御回路170でアクチュエータ60を動作させ反射鏡の形状を修正している。

しかし、これらの方式は原理的に幾何光学的に反射面を制御するために、1nm以下の微小量の計測・制御が必然的に要求されるため、多大な困難がある。

発明の開示

本発明の目的は、波面位相を補正することが簡単にできる構造の多層膜反射鏡等の光学素子を提供することである。

上記目的を達成するために、本発明は、多層膜により射出光の位相および振幅を制御する光学素子であって、前記多層膜を射出光の波面位相の調整量に応じて削り取ることにより、波面位相を調整することができる。この削り取りの制御を多層膜を形成する複数の物質の相違を検出することのより行うことができる。

補正膜と反射率が実質的に飽和する以上の多層膜とを形成することにより、補正膜の削除で位相の補正できない場合、多層膜も削除することにより補正することができ、より精密に位相の補正を行うことができる。

X線用や極端紫外線（真空紫外線）用の顕微鏡、露光装置、望遠鏡、マイクロプローブ、分析装置等に上述の多層膜反射鏡を用いることにより、X線や極端紫外線（真空紫外線）に対する位相差の制御を多層膜等を削除することで行えるために、容易に所望の結像性能を得ることができる。

図面の簡単な説明

図1は、電磁波の分類と電磁波の波長を示す図である。

図2（a）は、多層膜鏡の構成を示す図であり、（b）はMo-Si多層膜を示す図である。

図3は、多層膜反射鏡を用いたX線装置の概略構成を示す図である。

図4は、アクチュエータで基板に力を加えて多層膜鏡の形状を矯正することにより波面を補正する波面収差補正装置を示す図である。

図5は、反射を行う多層膜を多くした場合の反射率を示すグラフである。

図6は、反射率が飽和した以上の多層膜を削除した場合の位相と反射率の変化を示すグラフである。

図7は、本発明の他の実施形態の多層膜鏡の構成を示す図である。

図8は、他の実施形態における多層膜鏡の補正の手順を示す図である。

図9は、補助膜と反射率が飽和する以上の周期数を有する多層膜とを上から削った場合を示すグラフである。

図10は、本発明の多層膜を用いた軟X線顕微鏡システムの構成を示す図である。

図11は、本発明の多層膜を用いた軟X線望遠鏡システムの構成を示す図である。

発明を実施するための形態

以下、本発明の実施の形態に関して図を用いて詳しく説明する。

図5は、図2(a)で示したような多層膜を用いた反射鏡において、多層膜の膜の数である周期数（反射多層膜を構成している、反射率が高い物質の膜と低い物質の膜とによる組の繰り返し数）と反射率との関係を示すグラフである。この膜の厚さは、それぞれ $1/4$ 波長の厚さである。図5には、ルテニウム（Ru）とシリコン（Si）による多層膜、ロジウム（Rh）とシリコン（Si）による多層膜、モリブデン（Mo）とシリコン（Si）による多層膜、ルテニウム（Ru）と炭素（C）による多層膜、および、ロジウム（Rh）と炭素（C）による多層膜の周期数と反射率との関係が示されている。

この図5に示したグラフから分かるように、多層膜の周期数が大きくなると反射率は飽和して、多層膜を繰り返しても反射率が変化しなくなる。

極端紫外線あるいは軟X線、X線などの吸収膜物質を多層膜の要素として使う波長域では、飽和反射率は、100%には達せず、15%から80%程度の値をとる。この飽和状態においては、飽和以上に形成した多層膜は、振幅の増加には寄与しないが、反射光の位相の変化は引き起こす。

このため、反射率が実質的に飽和する以上の周期数の多層膜を形成することにより、飽和している範囲の多層膜を削除することによって、波面位相の補正を行うことができる。これは、例えばX線や極端紫外線（真空紫外線）に対する多層膜鏡では、各界面における反射はごくわずかで、積層数は数十層から数百層を要する。理論解析によれば反射は実質的に多層膜全体で物理光学的に起こる。このため、表面部の多層膜は実質的に透過膜として機能しているからである。

本発明は、多層膜として反射率が実質的に飽和する以上の周期数あるものを形成して、多層膜を射出光の波面位相の調整量に応じて削り取ることにより、波面

位相を調整する。補正量が比較的小さい場合、多層膜を削り取ることにより位相補正ができ、後で説明する補正膜を追加して形成する場合に比べて、反射率の変動を小さくできる。

図6に、反射率が飽和する以上に形成した多層膜を削除して、位相や反射率の変化を計測した例を示す。測定した軟X線の波長は12.78nmであり、多層膜は、Mo/Siで構成され、それぞれ1/4波長の厚さを有しており、121層を形成している。波長12.78nmの軟X線に対する、多層膜を形成しているシリコン(Si)の反射係数 n_{Si} およびモリブデン(Mo)の反射係数 n_{Mo} は、

$$n_{Si} = 1.00276 - 0.0015i$$

$$n_{Mo} = 0.9324 - 0.00598i$$

である。この多層膜による反射率は、76.4%である。これを上部から削除していき、位相(a)および相対的反射率(b)の変化をそれぞれ示している。このグラフから分かるように、反射率が飽和する以上に形成した多層膜を削除しても、反射率の変化は起こさないが、反射光の位相の変化は引き起こす。

図6のグラフで表れている位相の変化ステップは、多層膜の1周期のミリング(削除)で生じる。すなわち、Moの膜のミリングで減少し、Siの膜でわずかに増加する位相変化が生じる。図6から、Mo/Si多層膜の場合、各層は4nm程度の膜厚であるので、Mo1層のミリングは位相角にして5度の減少に相当する。この値は、基板の形状誤差に直せば

$$(13\text{ nm}/2) * (5\text{ 度}/360\text{ 度}) = 0.09\text{ nm}$$

であり、基板の形状誤差を1周期の膜のミリングによって、0.9Åでデジタル的に制御できることを示す。言い換えれば、表面の所定の部分にある補正量でミリングしようとする場合、表面に現れる物質がMoからSiへと変化したときにミリングを止めることにより、ミリングの厚さを精密に制御できる。

ミリングによる物質の変化は、ミリングで放出される物質をモニターする方法、二次電子の放出イールドの物質による変化を利用する電子的な方法、さらには、可視光の光学定数の変化などの光学的な特性変化を利用する反射率測定法、エリブソメトリーなどの方法も簡便に使える。これらの方法は、削除量を時間的に安定させて、削除時間でミリング深さを制御するというもっとも一般的な方法に容

易に併用できる。これらの特徴は、位相補正が多層膜の表面に施される1周期以上のミリングでもたらされることからくる特徴である。

上述では、図6におけるMo/Si多層膜の例で、1周期ごとのミリングを行う場合、1周期で基板形状誤差0.1nmの精度が出せることを説明した。しかしながら、1周期のミリングを詳細にみると、

1. Si層のミリングでは、位相がほとんど変わらなくなる（屈折率がわずかに1より大きいので、実際にはわずかに増加している）。
2. これと同時に、Si層のミリング中は、相対強度反射率はほとんど変化しない平坦な状況になる（干渉による振動変化の底の部分）。
3. 一方、Mo層のミリング中は、位相が減少し、反射率が変化する。

ことが分かる。従って、上述のデジタル的ミリングでは、常に各Siの膜の部分でミリングを止めれば、位相だけ一定各度づつ（6度くらい）変化し、反射率は変化しない。具体的には、Mo層を削って、Siが出てきたところで止めればよいので、ミリングを停止するタイミングに大幅にゆとりが出る。具体的には、Si膜厚3.5nm程度の範囲内で少なくとも+1nmの余裕が出る。また、この性質を利用して、反射率の変化を容易に1%以内にできる。

さて、多層膜の複素振幅反射率を複素平面上で考えると、動径が振幅に等しく、偏角が等しい点となり、多層膜の削除により、複素振幅反射率は、実質的に中心が原点に一致した円周上を動いていることになる。

理論的に、表面から削っていく場合の、振幅反射率の変化を求める場合、位相と振幅の計算の基準は、常に多層膜の最上表面にある。従って、表面からある部分を削る効果を計算するには、削る前の多層膜の表面を位相の基準面とする必要がある。この目的を満たすために、ある厚さdを削ったとき、仮想的に真空の層を厚さdだけ積むことにして計算する必要がある。これにより、基準面が常に削る前の位置に固定することができ、所定の位相および振幅の削り取りによる効果を正確に算出することが可能である。

図7に、本発明の反射鏡の他の構成を示す。図7において、基板10上に実質的に飽和する以上に形成した多層膜20上に、補正膜50を形成した構成を有している。

例えばX線や極端紫外線（真空紫外線）に対する多層膜鏡では、各界面におけ

る反射はごくわずかで、積層数は数十層から数百層を要する。理論解析によれば反射は実質的に多層膜全体で物理光学的に起こる。従って、図7に示すように、実質的に飽和する以上の多層膜20の最上表面に位相補正層50を付加すれば、透過型の位相補正膜として機能させることができる。ただし、この波長域で透明な物質は存在しないから、位相補正膜を構成できる物質には、屈折率 n とともに消衰係数 k の条件も満たす必要がある。

補正膜を構成する膜物質は、屈折率差 $(1 - n)$ が大きく、消衰係数 k が小さいほど位相補正量を大きくとれる。従って、光学的な物質選択基準は、単位厚さによる位相変化量と吸収による振幅減衰の比で判断できて、 $\{ \text{屈折率差} (1 - n) / \text{消衰係数} k \}$ が大きい物質が適している。

波長13nmの軟X線を例にとった場合、軟X線領域での膜の屈折率 n と真空の屈折率1との差 $(1 - n)$ が0.1程度以下になるモリブデン(Mo)膜(屈折率差0.065, 消衰係数0.0065)を用いれば、物理光学的な位相差の制御は、屈折率差 $(1 - n)$ が1/15程度であることから、幾何学的な膜厚の制御が1/15程度の分解能で行える。つまり、モリブデン膜における15nmの膜厚の制御で実効的なX線多層膜結像鏡の波面制御1nmを達成し、所望の結像性能を得ることができる。よって、補正量は上述の通り、屈折率差 $(1 - n)$ と膜の厚さ d の変化量 Δd との積であるから、位相誤差を0.1nmの精度で補正するためには補正膜厚を1.5nmの精度で削ればよいことになる。

また、補正膜による反射率変化は、膜厚変化や多層膜の干渉を考慮した計算が必要であるが、反射率の減少率は単純な計算でも1nm当たり1.2%程度であり、反射率60%の鏡では0.7%程度減少するにすぎない。

補正膜により十分な補正ができない場合は、実質的に飽和する以上多層膜を削ることにより、さらなる補正を行うことができる。

モリブデンの他に、軟X線に対して、屈折率差 $(1 - n)$ が大きく、消衰係数 k が小さい物質としては、ルテニウム、ロジウム、ベリリウムがある。軟X線に対する補正膜としては、モリブデンを含むこれらの物質の内の1つ又はこれらの物質の組合せで構成することができる。

図8は、図7に示した補正膜および多層膜による補正の仕方の説明である。

図8(a)のように基板10上の多層膜鏡20に十分厚い補正膜50をあらか

じめ成膜しておき、ミリング等で補正膜50を必要量だけ削る（図8（b）参照）。この補正膜50の削除で十分に補正できない場合は、多層膜を削除する（図8（c）参照）。

この方法により、ミリングされた補正膜等の最上表面は荒れるが、真空との屈折率差が小さいため、透過波面は粗さの影響をほとんど受けない。

図7および図8で説明したように、多層膜を、実質的に飽和する以上の周期数形成し、その上に補正膜を形成した後、補正膜や多層膜を上から削除して、波面位相の変化を計測した例を示したグラフが図9である。図9（a）に示すように、Mo/Siの多層膜を121周期形成後、モリブデン（Mo）による補正膜を300Å形成したものを上から削除する。波長12.78nmの軟X線に対する、多層膜を形成しているシリコン（Si）の反射係数 n_{Si} およびモリブデン（Mo）の反射係数 n_{Mo} は、

$$n_{Si} = 1.00276 - 0.0015i$$

$$n_{Mo} = 0.9324 - 0.00598i$$

である。また、補正膜300Åおよび121層の多層膜による反射率は、56.2%である。

このような構成の補正膜および多層膜を上から削除した場合を、図9（b）に示している。図9（b）においては、波長12.78nmの軟X線に対する相対反射率（削除していないときを1：右目盛）と波面位相の変化（削除していないときを0：左目盛）を示している。補正膜を削除する際に、位相や反射率の変化がリニアではなく変動している理由は、Mo膜の干渉による。また、多層膜を削除しているときの位相変動や反射率変化の周期は、周期膜の周期と一致している。多層膜部分を削除する際の反射率の変動は、補正膜を削除する際の変動と比較すると小さい。

補正膜を削除した後の図9（b）のグラフから分かるように、多層膜を削除することによっても、位相を変化させることができる。しかし、補正膜を削除するときより、削除量に対する位相補正できる量は少ない。

<反射鏡の使用例>

図10は、上述の簡単に波面誤差を補正することができる反射鏡を用いた軟X線顕微鏡システムを示している。軟X線は先に述べた通り、空気中で吸収されてし

まうので、軟X線の光路は真空槽200内にある。また、このシステムは大きく分けて光源、結像光学鏡、検出系、そして制御計測システムの4つにわかれており、それらを用いて試料310を観察することができる。

軟X線光源としては、レーザー発生装置210、金属ターゲット300、分光器220そしてピンホール230が用いられている。結像光学鏡240は中央に穴をあけた凹面の上述した多層膜鏡と、その真向かいに凸面の上述の多層膜鏡を組合せて構成されている。そして、試料310に照射した軟X線を検出するための光電面252を備えた2次元検出器250、検出データを取りこんだり、試料の位置の制御をするコンピュータ260がある。

この構成において、まず、光源としての軟X線を発生させるために、パルスレーザー発生装置210より強力な赤外線パルスレーザーをレンズで金属ターゲット300に集光すると、エネルギーが高いプラズマを発生する。そのプラズマはいろいろな波長の電磁波を放射する。そこで、分光器220を用いていろいろな波長の電磁波の中から軟X線を取り出す。分光器220より射出した軟X線は、ピンホール230を通過し、試料310を照射する。照射された試料310の軟X線は結像光学鏡240で試料310の写像を拡大し、2次元検出器250の光電面252上に結像する。そしてコンピュータ260が2次元検出器250で検出されたデータを取りこみ、画像化する。その他にもコンピュータ260は前述の試料310の位置を制御したりもする。

上述のような顕微鏡システムに用いる反射鏡において、上述の構成を用いることにより、1nm以下の精度及び分解能で光線の波面収差補正を行える。これにより、基板の形状誤差が所望の値に達しない場合でも、多層膜を成膜した後に、補正膜等を用いて最終的なX線波面補正を行うことで、使用状況に於いて最適な波面精度を得ることもできる。

この補正膜等による補正により、X線望遠鏡の応用では、斜入射円筒鏡を入れ子にしたネスティド・タイプの望遠鏡に代わり、直入射のカセグレイン・タイプ等の望遠鏡が軽量かつ高性能に構成できる。図11にこの望遠鏡の構成例を示す。

図11において、カメラ450に反射型の望遠鏡400を付けた構成である。この反射型望遠鏡400を構成する反射鏡410および415に、上述で説明し

た多層膜反射鏡を用いている。外側の筒 4 2 0 に入射した光は、反射鏡 4 1 0 で反射した後、反射鏡 4 1 5 で反射してバッフル 4 3 0 から、カメラ 4 5 0 に入射する。

この構成により、例えば人工衛星搭載用の軽量高性能の X 線望遠鏡では、多層膜鏡の波面収差を減少することによって、従来の望遠鏡では得ることができなかった観測波長程度という極限の分解能が期待できる。

X 線マイクロプローブに対して、上述の多層膜反射鏡を用いることもできる。X 線マイクロプローブにおける応用では、従来の数十 μm の空間分解能を 0. 0 1 μm の領域まで微細化できるので、各種サブミクロン・デバイスを含め、X 線マイクロプローブの検査対象を飛躍的に拡大できる。

X 線分析装置に対しても上述の多層膜反射鏡を用いることができる。この X 線分析装置では、ビームを平行にコリメートしたり、集光したりすることができるため、角度精度が向上するとともに微小試料の観察ができるようになる。また、結像系と組合せて、2 次元の画像での分析による応用に使えるようになる。

上述した X 線顕微鏡、X 線望遠鏡、X 線マイクロプローブ、X 線分析装置ばかりでなく、縮小投影露光装置における多層膜レチクル・マスクおよび結像鏡において、反射波面に生ずる欠陥を修復できる。

他にも X 線透過型多層膜の各種応用に於いて、多層膜鏡の波面の補正が容易に行えるので、X 線の透過および反射波面の位相を目的の値、目的の 2 次元分布に調節することができる。

また、上記においては、X 線を用いた機器として説明したが、極端紫外線（真空紫外線）等を使用する機器に対しても当然のことながら同様に適用することができる。さらに、本発明の原理は、光の物理光学的な性質を利用しているので、紫外線、可視光線、赤外線、さらにマイクロ波領域など、多層膜を利用する全ての電磁波に対して有効である。例えば、反射波面を高精度化する応用では、レーザー発信器用ミラーや、同様な、ファブリーペロー用、リング・レーザー・ジャイロ用などの共振器を構成するミラーには大変有効である。また、回折効果を利用して、空間的な波長分散特性を持たせることができ、これに付随する偏光特性を利用すると、波長分散を持つ偏光素子ができるので、ミラーあるいはビーム・スプリッターに使用することができる。特に、光磁気装置のハーフ・ミラーには

偏光特性が有効である。

本発明の多層膜を用いて、位相格子も作成することが可能である。位相格子を作成する場合は、基板の表面に多層膜を用いて、位相差 180° を与える厚さの溝構造を形成する。この位相格子は、二次元位相格子として機能し、新しいタイプの回折格子である。従来の方法では、基板に溝構造を形成するために、基板表面が粗れて、その上に形成する多層膜の特性が劣化する。また、加工精度は、使用する波長の少なくとも $1/20$ 以下に保つ必要がある。

本発明の手法では、従来の幾何学的な反射面位置の制御では達成できない精度が光路差の制御で達成できる。光路差は、多層膜のミリング厚さ d の屈折率差 $(n-1)$ の積であるであり、この屈折率差は多層膜の平均屈折率 n と真空（媒質）の屈折率 1 との差である。厚さ d のミリングによる波面補正の精度は、 $n-1$ が小さいほど高くなる。精度の向上は、可視光ではガラスなどの透明物質の場合は $1.5-1=0.5$ で2倍であり、軟X線領域では屈折率は 1 より僅かに小さく、 $1-n$ は 0.01 のオーダーであるため百倍のオーダーの精度向上が見込まれる。

また、本発明による多層膜を用いて振幅変調ホログラムとして使用することもできる。この場合は、表面の形状を面内で二次元で制御して多層膜を削除することによりホログラムを形成し、射出波面の位相と振幅を整えることができる。

本発明の多層膜の形成により、位相振幅フィルタリングとして使用できる素子も作成することができる。この場合は、結像系と組み合わせることにより、空間周波数空間での各種のフィルタリングを行う新しい手段を提供する。

以上の方法に、さらに光学的な厚さ（光路長）を時間的に変調することで、新しい画像ディスプレイ・パネルなどを実現する新しい形成方法を提供できるものである。また、多層膜は、下部からの反射に対して実質的に透過膜として機能するため、透過型として適用できる。

このほかに、従来にない全く新しい応用として、屈折率が波長で大きく異なる特性を利用すると、光の波長で表面の形状が異なって現れることを利用した素子が作れる。たとえば、極端紫外線（EUV）用のミラーでは、波面補正後はEUV光に対しては、理想的な形状（たとえば球面）であるが、表面の形状は球面では無くなるので、表面で反射する光は球面からずれて、たとえば発散するといっ

た特性が出る。すなわち、屈折率が違えば、波長によって表面の形を変えたと同等の特性を出すことができる。これは、たとえばある波長の光は収斂するが他の波長の光は収斂しないといった特徴を持ったミラーを作ることができる。この特性を結像系に応用すると、ある波長の光はシャープに結像できるが他の波長はぼけてしまう光学系が作れる。また、その逆に、収斂点でこの光を止めれば、ある波長だけ取り除かれた光での結像ができる。透過光学系に例えると、色収差が非常に大きい反射鏡を作れることを意味する。この特徴を発展させると、波長によって焦点距離が異なるミラー、二重焦点ミラーなど、屈折率の波長分散を積極的に利用する素子可以实现できる。従来の透過型光学素子は、透明物質、すなわち屈折率の正常分散領域にある物質を利用しているので、屈折率分散はわずかで、プリズム型の分光計などに利用されるに過ぎず、屈折率分散は、むしろ、色収差として利用価値のない邪魔者であった。本発明の多層膜反射鏡では、基本的に反射型であるので、X線から赤外、マイクロ波まで波長を選ばず、各種の組み合わせが可能になる。各種の物質の異常分散領域、あるいは分子による吸収領域などでは、屈折率変化は非常に大きく、これらを積極的に利用することができる。

産業上の利用可能性

上述する様に、本発明により、光および電磁波の射出光の位相と振幅を制御する目的で形成された多層膜について、その性質を大幅に向上することができる。特に、多層膜を利用した結像光学系においては、反射および透過の波面位相の制御性を上げて、結像性能を極限まで改善できる。

請 求 の 範 囲

1. 多層膜により射出光の位相および振幅を制御する光学素子であって、前記多層膜を射出光の波面位相の調整量の応じて削り取ることにより、波面位相を調整することを特徴とする光学素子。
2. 前記多層膜は反射のために形成されており、前記多層膜は、反射率が実質的に飽和する以上の周期数が形成されていることを特徴とする光学素子。
3. 前記光学素子は軟X線用であり、前記多層膜は、モリブデン層およびシリコン層で形成されていることを特徴とする請求の範囲第1又は2項記載の光学素子。
4. 多層膜により射出光の位相および振幅を制御する光学素子であって、前記多層膜上にあり、入射光線に対する屈折率 n および1との差 $(1 - n)$ が大きく、かつ、入射光線に対する消衰係数 k が小さい物質の補正膜を有し、前記補正膜、前記多層膜を射出光の波面位相の調整量の応じて削り取ることにより、波面位相を調整することを特徴とする光学素子。
5. 前記多層膜は反射のために形成されており、前記多層膜は、反射率が実質的に飽和する以上の周期数が形成されていることを特徴とする請求の範囲第4項記載の光学素子。
6. 前記光学素子は軟X線用であり、前記補正膜は、モリブデン、ルテニウム、ロジウム、ベリリウムのうちの1つ又はこれらの組合せを用いていることを特徴とする請求の範囲第4項又は第5項記載の光学素子。
7. 前記多層膜は、モリブデン層およびシリコン層で形成されていることを特徴とする請求の範囲第6項記載の光学素子。

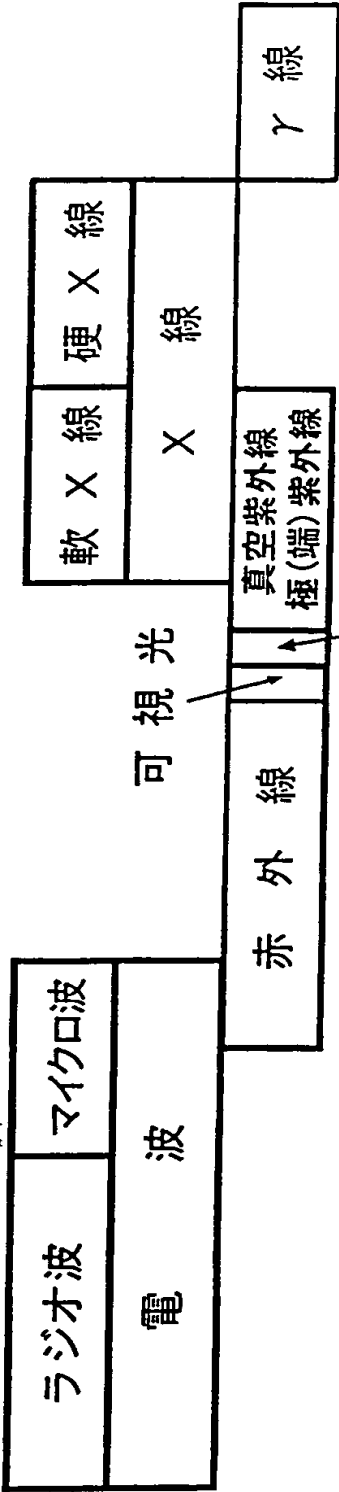
8. 基板上に射出光の位相および振幅を制御するために多層膜に形成し、
前記多層膜を射出光の波面位相の調整量に応じて削り取ることにより、
波面位相を調整することを特徴とする光学素子形成方法。
9. 前記多層膜は、反射率が飽和する以上の周期数形成する
ことを特徴とする請求の範囲第8項記載の光学素子作成方法。
10. 多層膜の削り取りの制御を、多層膜を形成する複数の物質の相違を検出する
ことのより行うことを特徴とする請求の範囲第8項又は第9項記載の光学素子
作成方法。
11. 基板上に多層膜を、反射率が飽和する以上の周期数形成し、
前記多層膜上に、補正膜をさらに形成し、
前記補正膜、または、前記補正膜と前記多層膜を、射出光の波面位相の調整量
に応じて削り取る
ことを特徴とする光学素子作成方法。
12. 請求の範囲第1項～第7項のいずれかに記載の光学素子を用いた顕微鏡。
13. 請求の範囲第1項～第7項のいずれかに記載の光学素子を用いた露光装
置。
14. 請求の範囲第1項～第7項のいずれかに記載の光学素子を用いた望遠鏡。
15. 請求の範囲第1項～第7項のいずれかに記載の光学素子を用いたマイクロ
プローブ。
16. 請求の範囲第1項～第7項のいずれかに記載の光学素子を用いた分析装
置。

17. 請求の範囲第1項～第7項のいずれかに記載の光学素子を用いたレーザ発振器。

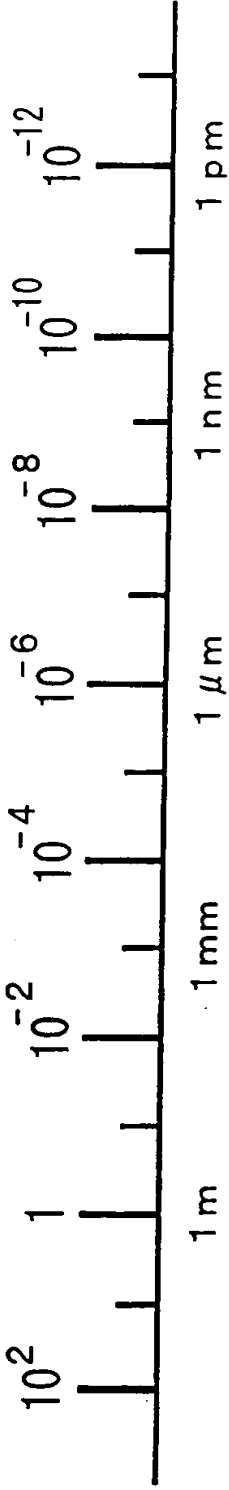
18. 請求の範囲第1項～第7項のいずれかに記載の光学素子を用いたファブリペロ干渉計。

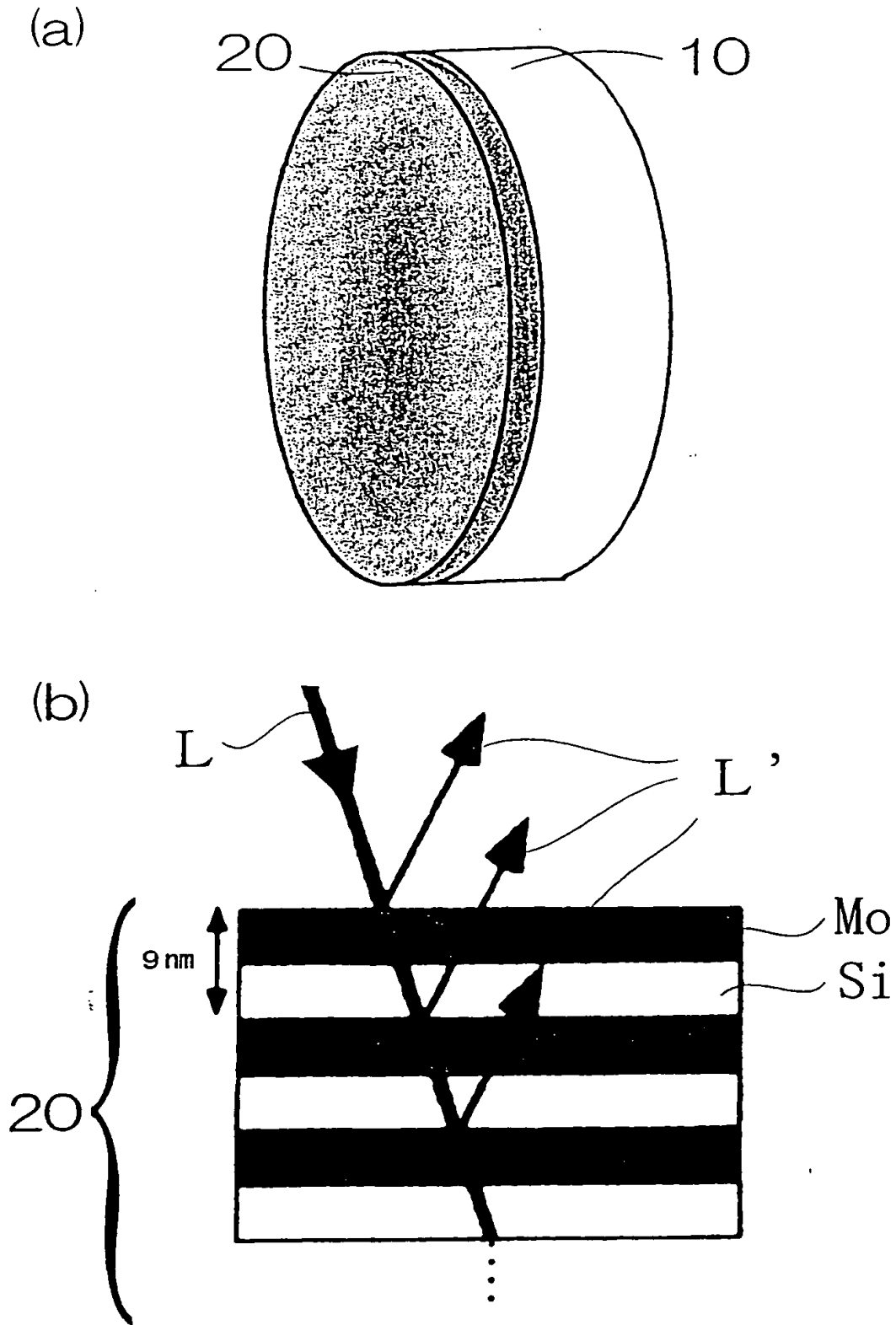
19. 請求の範囲第1項～第7項のいずれかに記載の光学素子を用いたリングレーザ・ジャイロ装置。

(a) 電磁波の分類

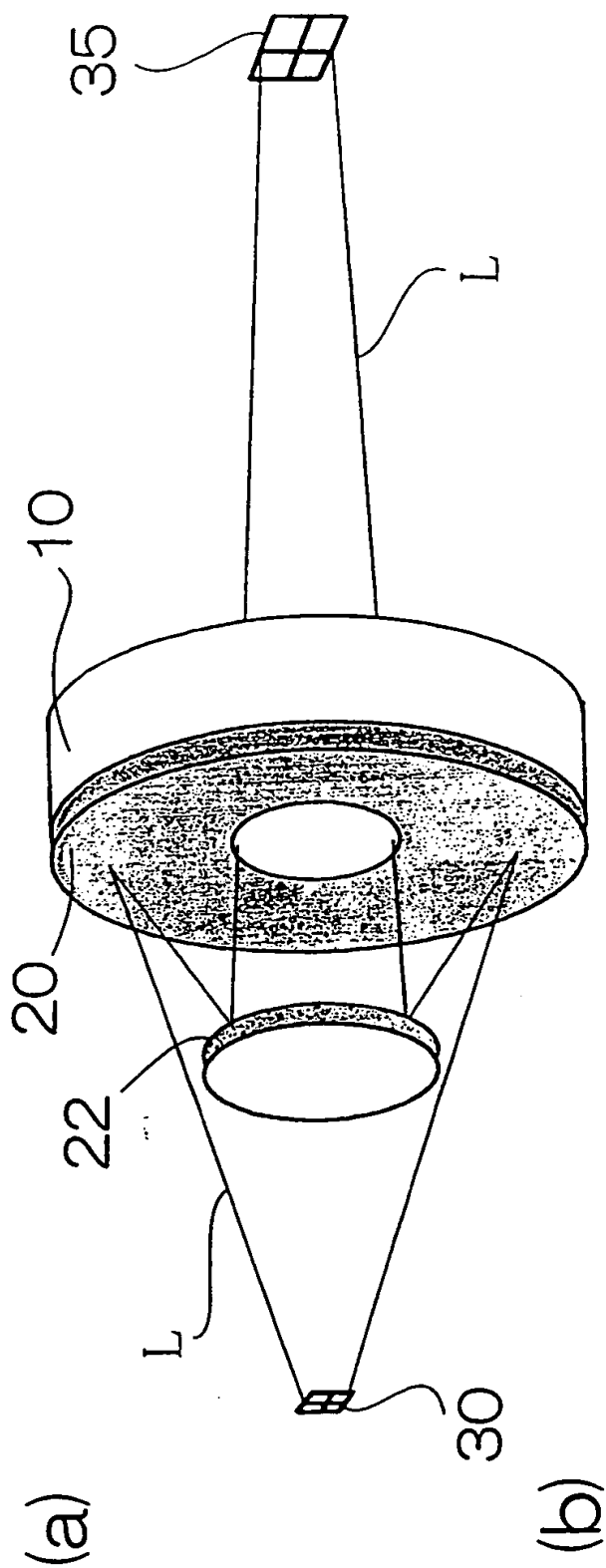


(b) 電磁波の波長 (m)



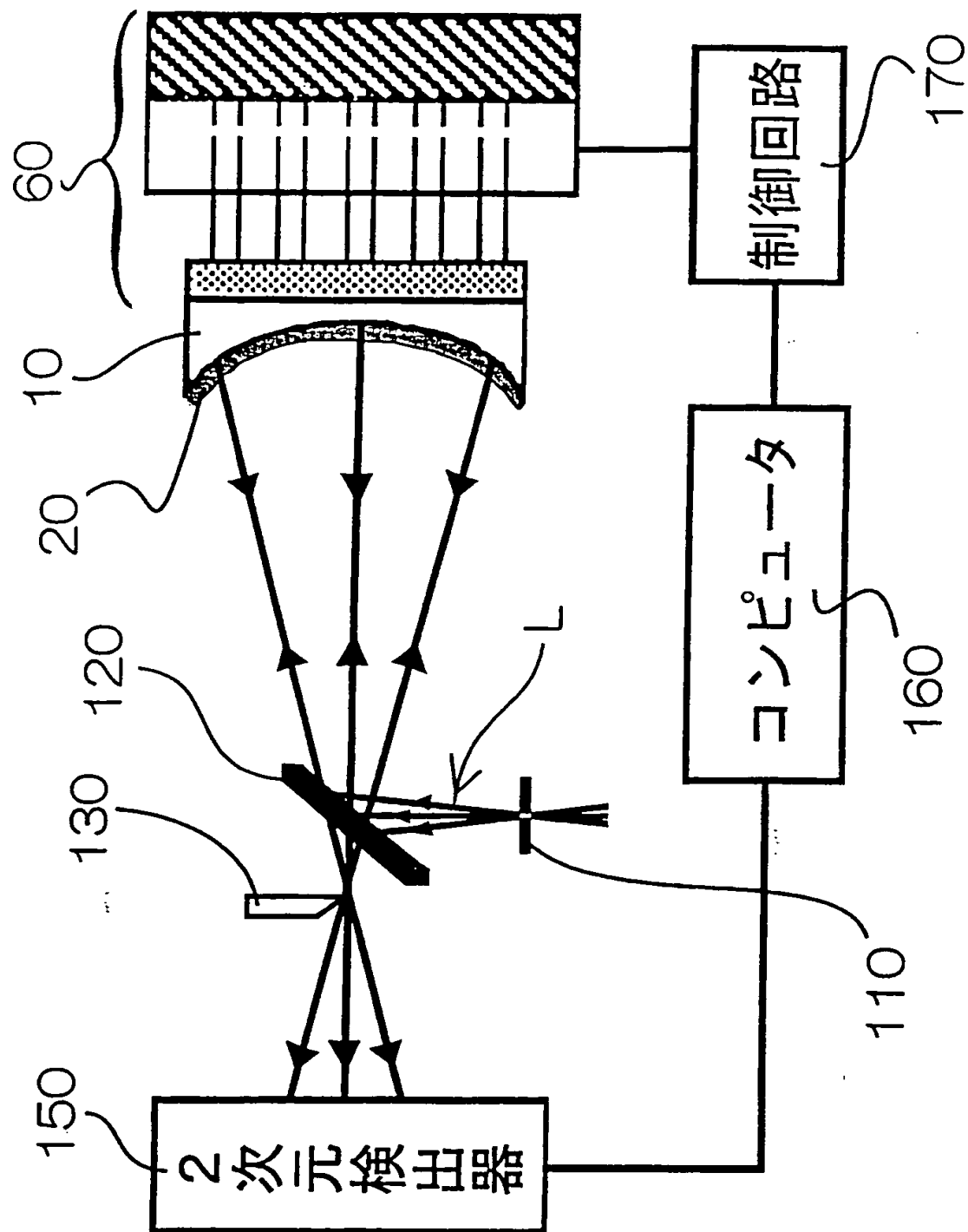


第 2 図

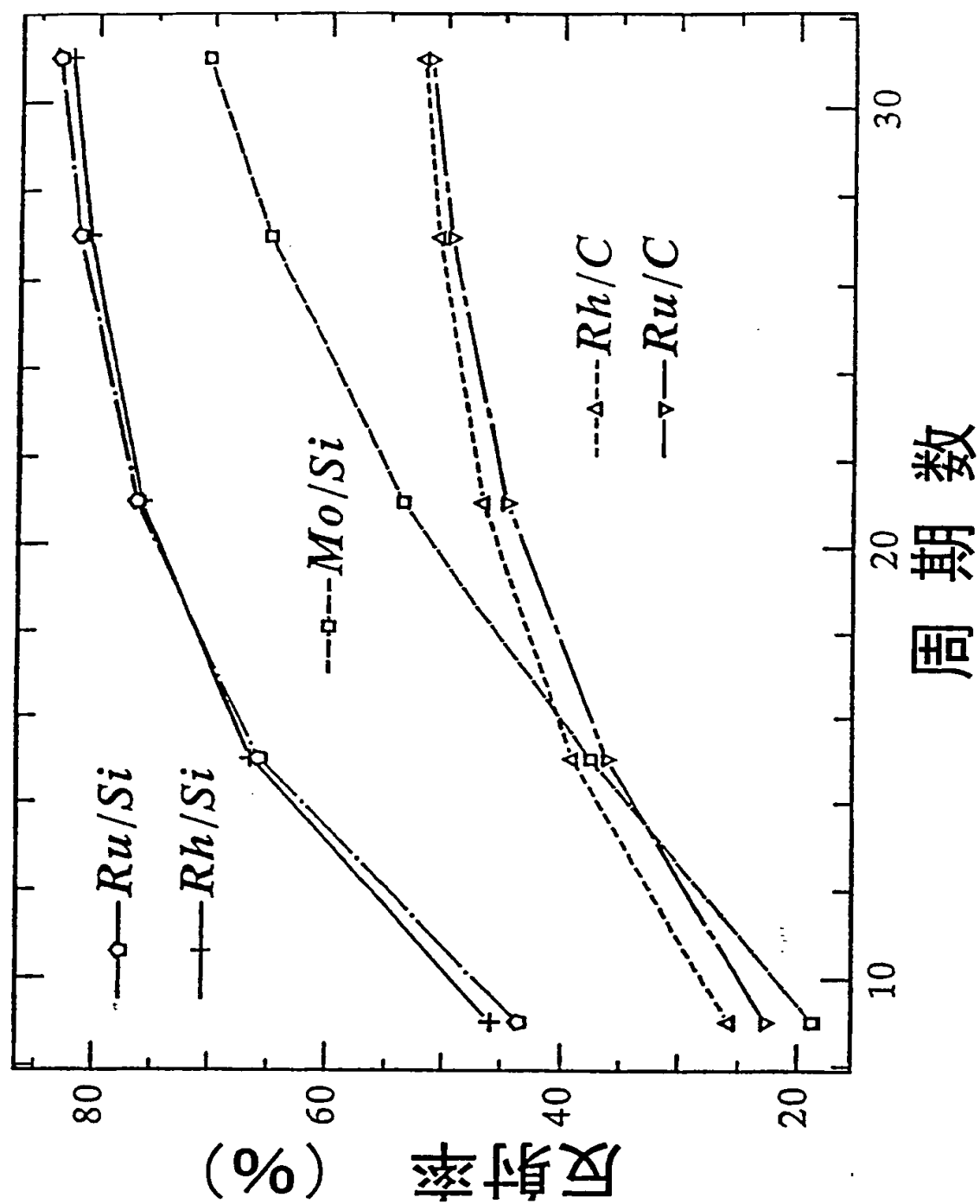


(1) 物体 → 顕微鏡 → 拡大像
 (2) 縮小像 ← マイクロフォーカス, 縮小露光 ← 物体

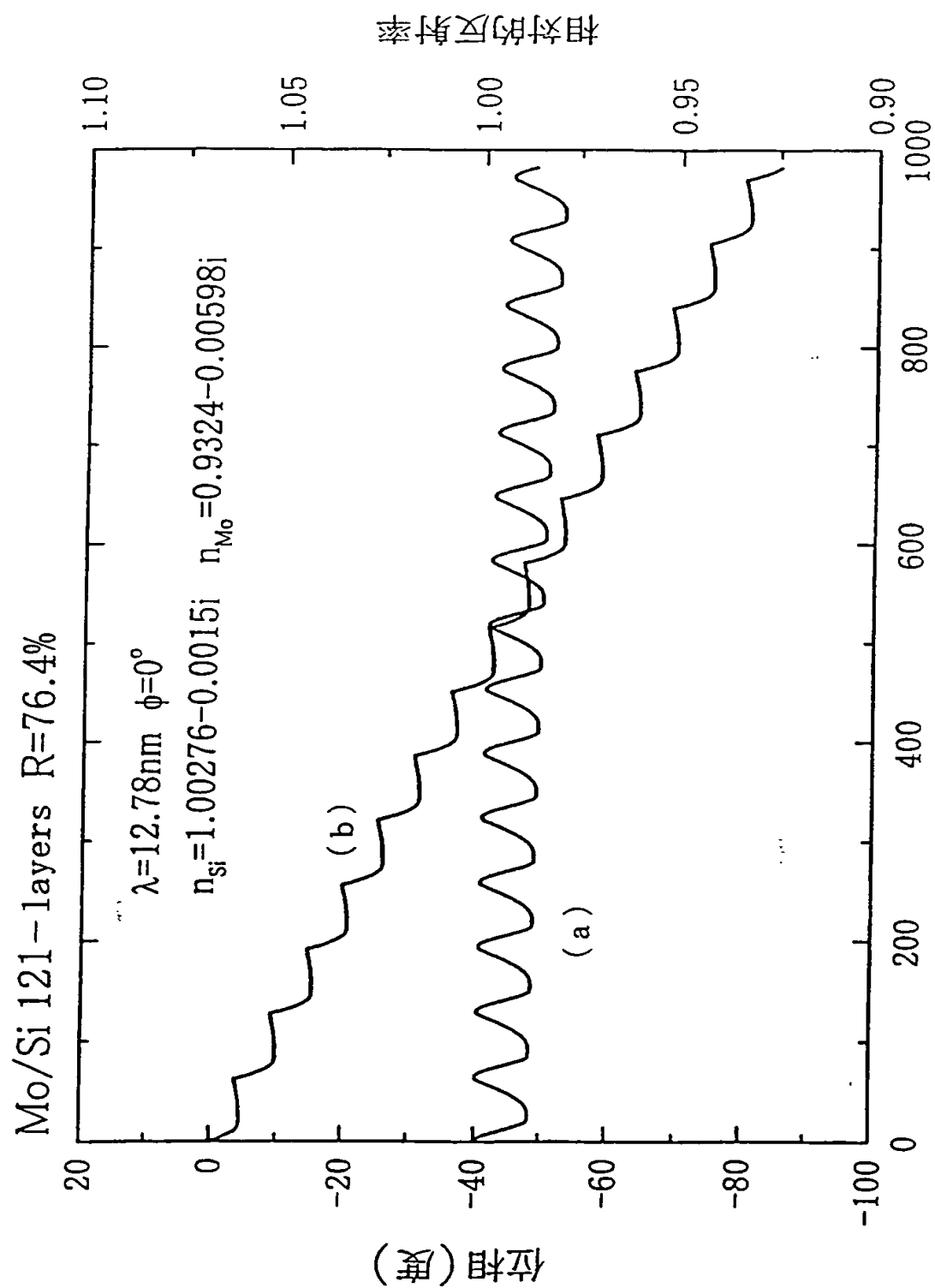
第 3 図



第 4 図

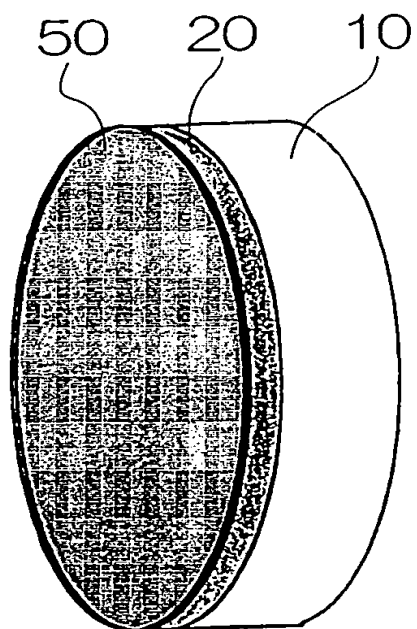


第 5 図

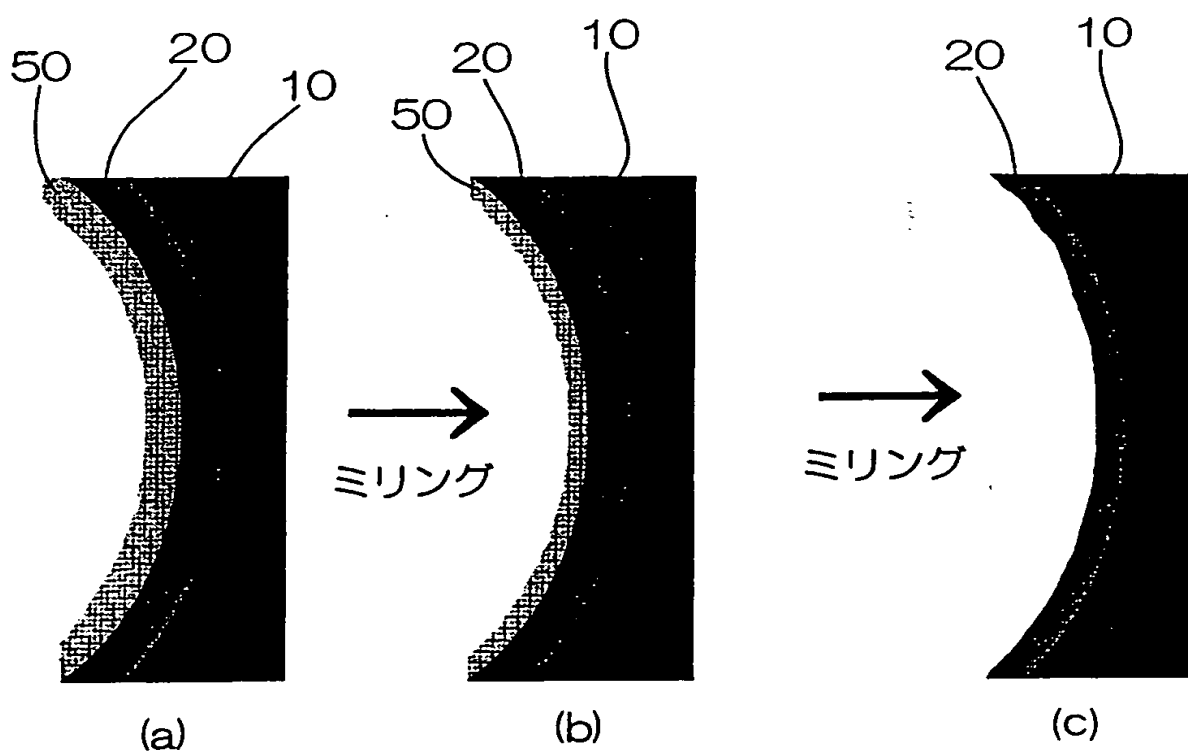


ミリング厚 (Å)

第 6 図

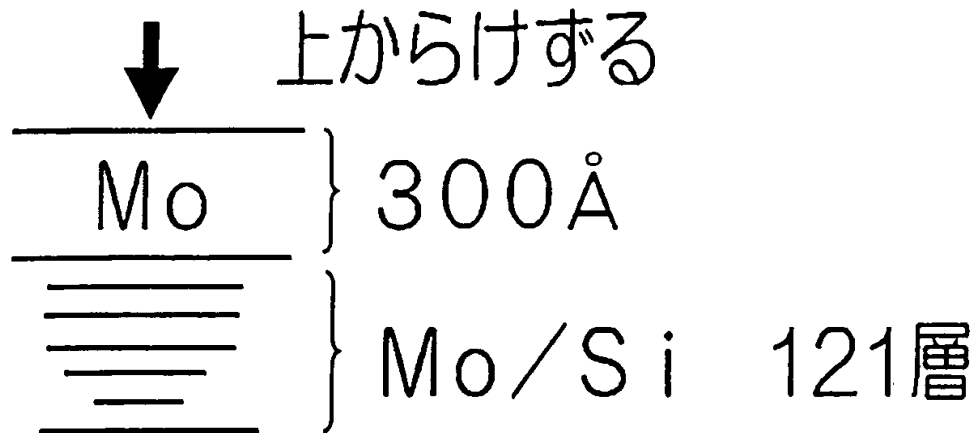


第 7 図

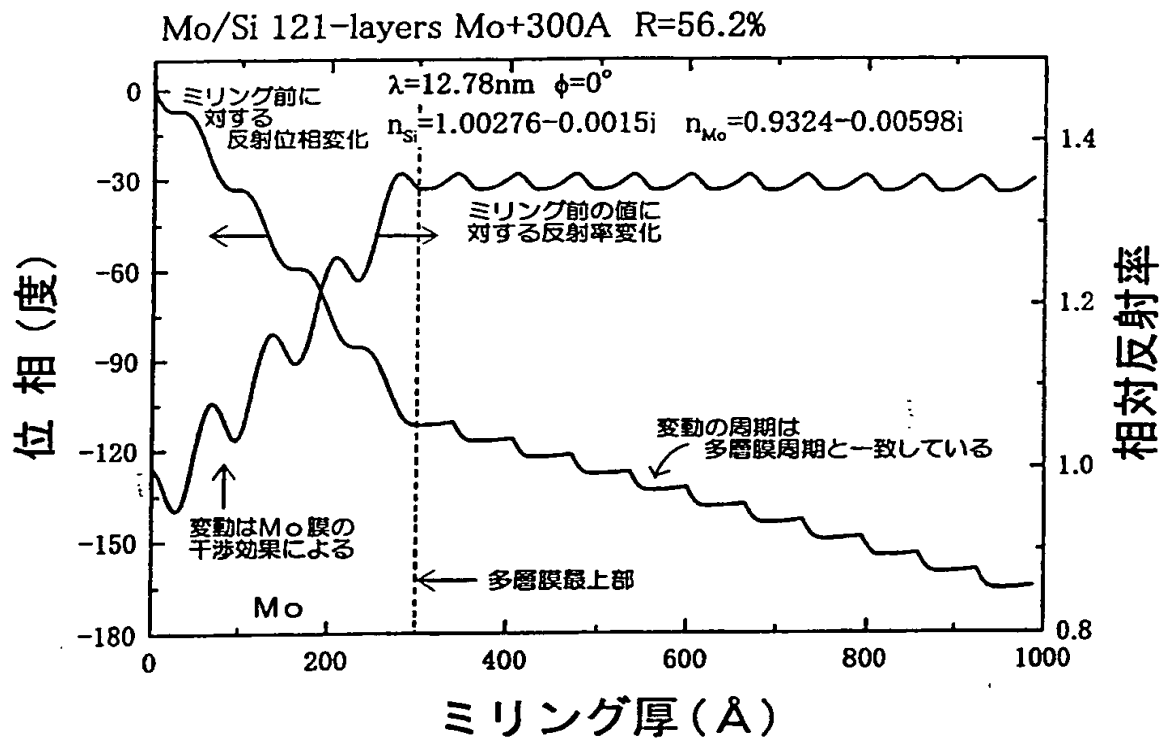


第 8 図

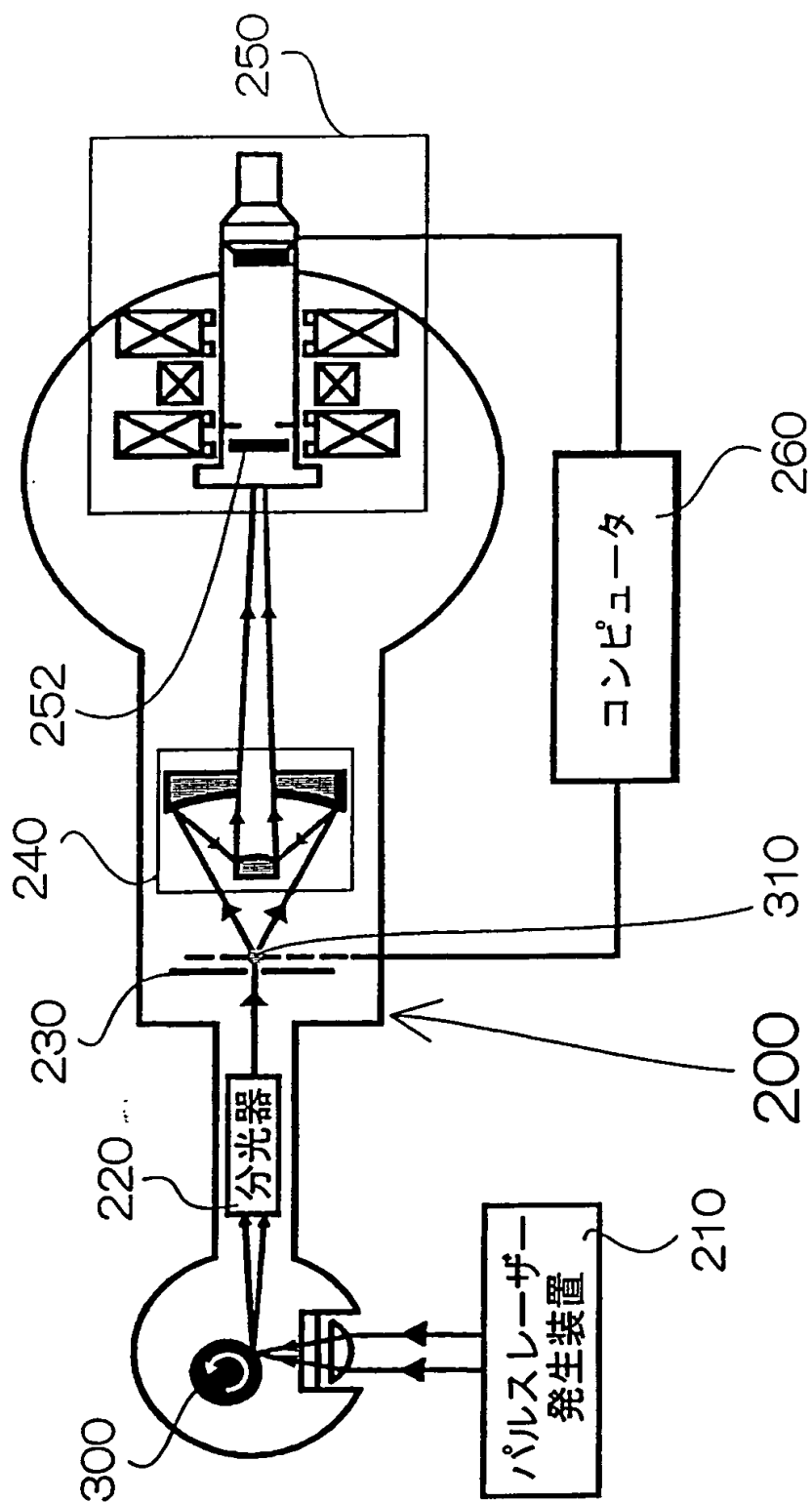
(a)



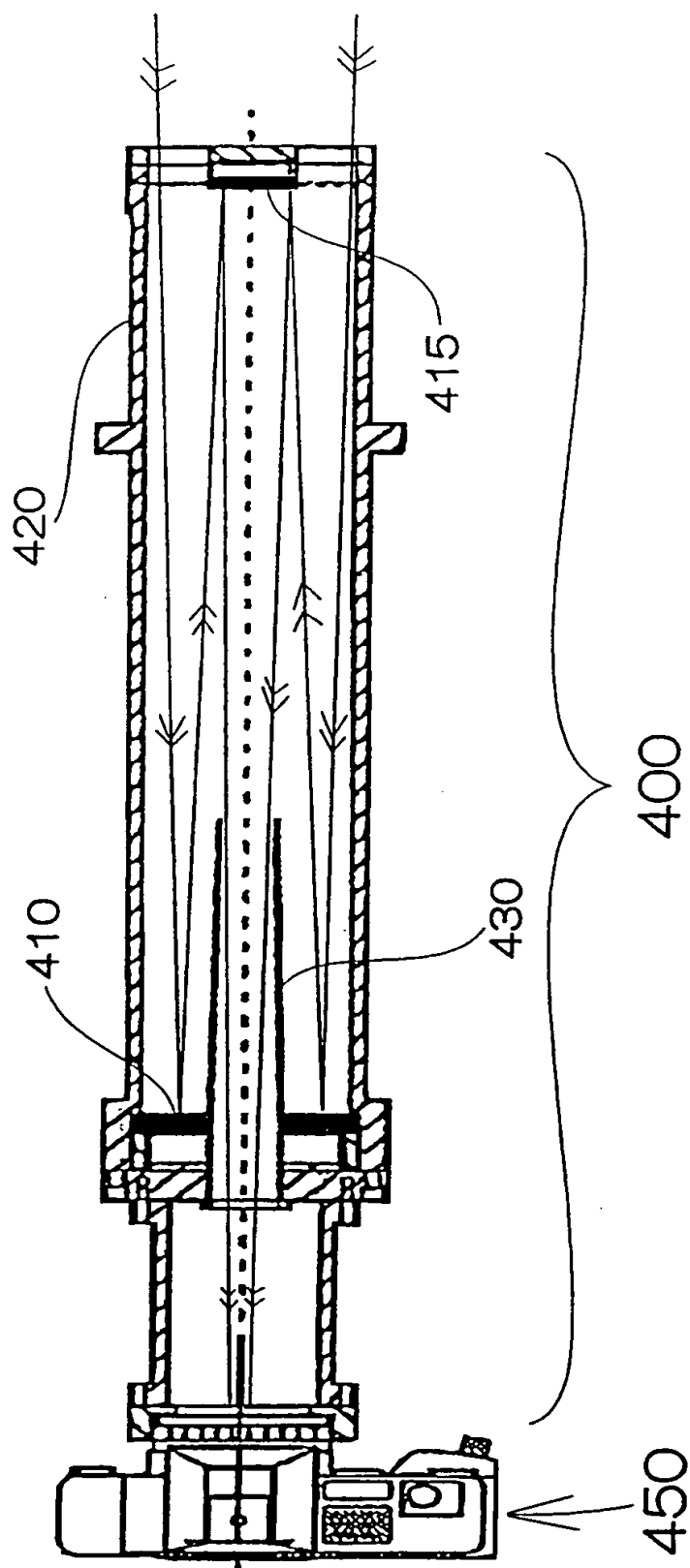
(b)



第 9 図



第 1 0 図



第 1 1 図

国際調査報告

(法8条、法施行規則第40、41条)

[PCT18条、PCT規則43、44]

出願人又は代理人 書類記号 19990241PCT	今後の手続きについては、国際調査報告の送付通知様式(PCT/ISA/220)及び下記5を参照すること。	
国際出願番号 PCT/JP00/05571	国際出願日 (日.月.年) 18.08.00	優先日 (日.月.年) 29.11.99
出願人(氏名又は名称) 株式会社東北テクノアーチ		

国際調査機関が作成したこの国際調査報告を法施行規則第41条(PCT18条)の規定に従い出願人に送付する。
この写しは国際事務局にも送付される。

この国際調査報告は、全部で 2 ページである。

☐ この調査報告に引用された先行技術文献の写しも添付されている。

1. 国際調査報告の基礎

a. 言語は、下記に示す場合を除くほか、この国際出願がされたものに基づき国際調査を行った。

☐ この国際調査機関に提出された国際出願の翻訳文に基づき国際調査を行った。

b. この国際出願は、ヌクレオチド又はアミノ酸配列を含んでおり、次の配列表に基づき国際調査を行った。

☐ この国際出願に含まれる書面による配列表

☐ この国際出願と共に提出されたフレキシブルディスクによる配列表

☐ 出願後に、この国際調査機関に提出された書面による配列表

☐ 出願後に、この国際調査機関に提出されたフレキシブルディスクによる配列表

☐ 出願後に提出した書面による配列表が出願時における国際出願の開示の範囲を超える事項を含まない旨の陳述書の提出があった。

☐ 書面による配列表に記載した配列とフレキシブルディスクによる配列表に記載した配列が同一である旨の陳述書の提出があった。

2. ☐ 請求の範囲の一部の調査ができない(第I欄参照)。

3. ☐ 発明の単一性が欠如している(第II欄参照)。

4. 発明の名称は ☒ 出願人が提出したものを承認する。

☐ 次に示すように国際調査機関が作成した。

5. 要約は ☒ 出願人が提出したものを承認する。

☐ 第III欄に示されているように、法施行規則第47条(PCT規則38.2(b))の規定により国際調査機関が作成した。出願人は、この国際調査報告の発送の日から1カ月以内にこの国際調査機関に意見を提出することができる。

6. 要約書とともに公表される図は、

第 9 図とする。 ☒ 出願人が示したとおりである。

☐ なし

☐ 出願人は図を示さなかった。

☐ 本図は発明の特徴を一層よく表している。

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))
Int. Cl⁷ G21K1/06

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))
Int. Cl⁷ G21K1/06

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996
日本国公開実用新案公報 1971-2000
日本国登録実用新案公報 1994-2000
日本国実用新案登録公報 1996-2000

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	JP, 63-211130, A (ソニー株式会社) 02. 9月. 1988 (02. 09. 88) 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-19
Y	JP, 06-180399, A (株式会社ニコン) 28. 6月. 1994 (28. 06. 94) 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-19

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

09. 11. 00

国際調査報告の発送日

21.11.00

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

中塚 直樹

印

2T

9715

電話番号 03-3581-1101 内線 3226

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP00/05571

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ G21K1/06

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ G21K1/06

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
 Jitsuyo Shinan Koho 1926-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2000
 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2000 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2000

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP, 63-211130, A (Sony Corporation), 02 September, 1988 (02.09.88), Full text; all drawings (Family: none)	1-19
Y	JP, 06-180399, A (Nikon Corporation), 28 June, 1994 (28.06.94), Full text; all drawings (Family: none)	1-19

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 09 November, 2000 (09.11.00)	Date of mailing of the international search report 21 November, 2000 (21.11.00)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer
Facsimile No.	Telephone No.